بررسی تأثیر استفاده از PVC بر خرابی رطوبتی مخلوط آسفالت گرم*

غلامحسین حامدی[۱]

چکیده *خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آ سفالتی از د ست دادن دوام و مقاومت نا شی از تأثیر رطوبت تعریف می شود. در این پژوهش، تأثیر ا ستفاده از ماده پلیمری پلی‌وینیل‌کلراید به‌عنوان ا صلاح‌کننده قیر بر خرابی رطوبتی مخلوط‌های آ سفالتی برر سی شده ا ست. آزمایش مقاومت ک شش ی غیرم ستقیم در شرایط خ شک و ۱، ۳ و ۵ سیکل یخ-ذوب و روش ترمودینامیک بر ا ساس اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی سنگ‌دانه‌ها و قیرها برای بررسی تأثیر مواد پلیمری استفاده شده است. نتایج ارائه‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از پلیمر پلی‌وینیل‌کلراید باعث افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی شده است. همچنین، پلی‌وینیل‌کلراید مقدار انرژی آزاد پیوستگی را افزایش و انرژی جداشدگی را کاهش داده است که باعث کاهش نرخ خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی می‌شود.*

واژه‌های کلیدی مخلوط آسفالت گرم، خرابی رطوبتی، PVC، مقاومت کششی غیرمستقیم، روش ترمودینامیک.

Evaluation the Effect of Polyvinyl Chloride on Moisture Sensitivity of HMA

G. H. Hamedi

Abstract *Moisture damage is defined as loss of strength and durability of asphalt mixtures in the presence of water. In this study, the effect of Polyvinyl Chloride (PVC) polymer was evaluated as an asphalt binder modifier on the moisture damage of HMA. Indirect tensile test in dry and 1, 3 & 5 freeze-thaw conditions and thermodynamic method according to the measurements of surface free energy components of aggregates and asphalt binders were used for evaluating the effect of polymeric materials. The results of this study show that using of PVC cause an increase in the strength of the asphalt mixture against the moisture damage. Also, PVC increased the free energy of cohesion and reduced the debonding energy. These cause decreased in the rate of the moisture damage of asphalt mixtures.*

Key Words Hot mix asphalt, Moisture damage, Polyvinyl Chloride, Indirect tensile strength, Thermodynamic method.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۶/۴/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۶/۱۲/۵ می‌باشد.

(۱) استادیار گروه عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

Email: hamedi@guilan.ac.ir

مقدمه

رطوبتی که از ساختار روسازی به نحو مناسبی زهکش نشده باشد، می‌توان باعث ایجاد خرابی در لایه‌هایِ آسفالتیِ روسازی شود. این رطوبت می‌تواند باعث از دست دادن پیوستگی در غشای قیر یا از دست دادن چسبندگی در سطح تماس قیر- سنگ‌دانه شود. خرابی ناشی از تأثیر رطوبت در مخلوط آسفالتی را خرابی رطوبتی می‌گویند. در واقع، رطوبت سبب می‌شود تا خصوصیات قیر تغییر یابد و آن را در برابر گسیختگی پیوستگی تضعیف نماید. همچنین، به علت آب‌دوستی سنگ‌دانه‌ها (به‌ویژه سنگ‌دانه‌های اسیدی) این انتظار وجود دارد که وارد شدن آب به سیستم قیر–سنگ‌دانه باعث ایجاد گسیختگی در سطح تماس این دو ماده شود. از دست دادن چسبندگی به‌خصوص در مورد سنگ‌دانه‌های اسیدی با احتمال و شدت بیشتری رخ می‌دهد [1].

فاکتورهای متفاوتی بر رخداد و شـــدت خرابی رطوبتی تأثیر می‌گذارند. این فاکتورها را می‌توان در دو د ستهٔ فاکتورهای داخلی و خارجی د سته‌بندی کرد [2]. برای بهبود عملکرد مخلوط آســـفالتی در برابر خرابی رطوبتی، باید به‌نحوی فاکتورهای مؤثر در رخداد خرابی را در راســـتای افزایش مقاومت تغییر داد. اســـتفاده از افزودنی‌های ضـــد عریان‌شـــدگی را می‌توان منطقی‌ترین روش به‌منظور بهبود مقاومت مخلوط آســـفالتی در برابر رطوبت دانست [3].

آزمایش‌های متعدّدی برای بررسی تأثیر افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی و تعیین حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی وجود دارد که می‌توان آنها را به دو دسته آزمایش‌هایی که بر روی مخلوط‌های آسفالتی متراکم‌شده و سست انجام می‌شوند، تقسیم‌بندی کرد [4]. آزمایش لاتمن اصلاح‌شده (Modified Lottman) مناسب‌ترین آزمایش موجود در بین این آزمایش‌ها است که بر طبق تحقیقات پیشین، بیشترین سازگاری را با نتایج میدانی نشان می‌دهد. علی‌رغم دقت مناسب پیش‌بینی حساسیت رطوبتی میدانی مخلوط‌های آسفالتی، می‌توان گفت این روش بر روی اندازه‌گیری خصوصیات اساسی مواد که به مکانیزم خرابی مربوط است، تمرکز نمی‌کند و شاخص ارائه‌شده، بیانگر مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر چندین مکانیزم مختلف خرابی در یک عدد بدون تفسیر است. در نتیجه، نمی‌توان گفت که دلیل مقاومت مناسب یا ضعیف یک مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت چه بوده است تا مهندس طراح روسازی بر اساس تفسیر نتایج، بتواند مخلوط آسفالتی را بازطراحی کند. بر این اساس، نیاز به روشی که چسبندگی سیستم قیر–سنگ‌دانه–آب را بر اساس خصوصیات پایه‌ای مواد به‌صورت کمی درآورد، احساس می‌شود. اندازه‌گیری انرژی آزاد سطحی قیر و سنگ‌دانه قابلیت استفاده‌های مختلفی در طراحی مخلوط‌های آسفالتی دارد [5].

پژوهش‌های پیشین

در پژوهشی که در دانشگاه تگزاس انجام شده است، مطالعه جامعی بر به‌کارگیری مفهوم انرژی آزاد سطحی، اندازه‌گیری مؤلفه‌های آن و کاربرد آن در صنعت روسازی صورت گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مفاهیم انرژی آزاد سطحی می‌تواند به انتخاب سازگارترین سیستم قیر–سنگ‌دانه برحسب چسبندگی و مقاومت در برابر خرابی رطوبتی کمک کند [6]. هِفِر(Hefer) به نقش مؤلفه‌های مختلف انرژی آزاد سطحی در تعیین حساسیت رطوبتی پرداخت و از این طریق توانست بین مخلوط‌های مختلف از حیث عملکرد در شرایط مرطوب تفاوت ایجاد کند [7]. در مطالعه‌ای توسط مقدس‌نژاد و حامدی [5] با استفاده از نتایج آزمایش‌های حساسیت رطوبتی ترکیبات مختلف مخلوط‌های آسفالتی، به بررسی ارتباط بین پارامترهای ترمودینامیک و پتانسیل خرابی رطوبتی پرداخته شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که پارامترهای معرفی‌شده به شکل معناداری با رخداد و شدت خرابی رطوبتی ارتباط دارند. در پژوهش دیگری با استفاده از تحلیل‌های آماری

به بررسی تأثیر پارامترهای ترمودینامیک و طرح اختلاط بر رخداد خرابی رطوبتی پرداخته شده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که پارامترهای ترمودینامیک شامل انرژی آزاد پیوستگی قیر، پوشش‌پذیری قیر بر روی سطح سنگ‌دانه، انرژی آزاد چسبندگی قیر–سنگ‌دانه و انرژی جداشدگی سیستم در رخداد عریان‌شدگی به نحو مناسبی می‌توانند حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی مختلف را پیش‌بینی کنند [8]. علاوه بر پژوهش‌های ذکر شده، پژوهش‌های محدودی نیز به نقش استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از مفاهیم ترمودینامیک پرداختند. عربانی و حامدی [9] در پژوهشی به نقش پوشش پلیمری سطح سنگ‌دانه‌ها در کاهش خرابی رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش انرژی آزاد سطحی و مدول دینامیکی پرداختند. در پژوهش آنها از اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگ‌دانه به‌منظور تعیین انرژی آزاد پیوستگی قیر و انرژی آزاد چسبندگی قیر–سنگ‌دانه استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که روش انرژی آزاد سطحی همبستگی مناسبی با نتایج آزمایش بارگذاری در آزمایشگاه را داراست. در مطالعه‌ای، خدایی و همکاران [10] به بررسی تأثیر مادهٔ ضد عریان‌شدگی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی پرداختند. این ماده، سطح سیلانول سنگ‌دانه‌های اسیدی را به سطح سیلوکسان تبدیل کرده و باعث کاهش حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی تحت بارگذاری سیکلی مورد استفاده در این پژوهش شده است. همچنین، نتایج روش انرژی آزاد سطحی نشان داده است که استفاده از این پوشش سبب کاهش خصوصیات اسیدی سنگ‌دانه‌ها و بهبود چسبندگی قیر–سنگ‌دانه شده است. در مطالعهٔ دیگری، عربانی و حامدی [11] به بررسی شاخصی برای تعیین حساسیت رطوبتی بر اساس روش انرژی آزاد سطحی و بارگذاری تکراری پرداختند. در این پژوهش درصدی از سطح سنگ‌دانه‌ها که در معرض عریان‌شدگی قرارگرفته‌اند به‌عنوان شاخص برای ارزیابی سازگاری بین قیر و سنگ‌دانه برحسب مقاومت در برابر حساسیت رطوبتی به‌کاررفته است [12].

بیان مسئله و اهداف

رخداد و شدت خرابی رطوبتی در مخلوط‌های آسفالتی با مفاهیم ترمودینامیک ارتباط نزد یک دارد. آنالیز بر اساس روش انرژی آزاد سطحی می‌تواند به فرآیند دقیق طراحی کمک کند که در زمینه صنعت روسازی کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. بر این اساس، به نظر می‌رسد انجام پژوهشی با تعیین پارامترهای مهم از خصوصیات مواد و تطابق آن با نتایج آزمایش‌های عملکردی می‌تواند در پیش‌بینی خرابی رطوبتی راه‌گشا باشد. پژوهش حاضر به‌منظور به‌کارگیری مفاهیم تئوری ترمودینامیک در رخداد و پیش‌بینی عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر عریان شدگی شکل گرفته است. هدف این پژوهش توسعه مفاهیم ذکرشده در سایر علوم نیست؛ بلکه هدف، استفاده از مفاهیم و پارامترهای مؤثر به‌منظور بررسی تأثیر افزودنی‌های مختلف در پیشگیری از خرابی مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت است. مهم‌ترین اهداف پژوهش حاضر عبارت‌اند از:

۱. بررسی تأثیر استفاده از افزودنی‌های ضدعریان‌شدگی بر اجزای انرژی آزاد سطحی قیر؛
۲. معرفی و محاسبه پارامترهای مورد ارتباط با خرابی رطوبتی از تئوری ترمودینامیک؛
۳. بررسی تأثیر استفاده از افزودنی‌های ضدعریان‌شدگی بر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر رطوبت با استفاده از پارامترهای انرژی آزاد سطحی؛
٤. بررسی تأثیر استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی بر حساسیت رطوبتی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش‌های مکانیکی؛
۵. مقایسه و تحلیل نتایج روش‌های تعیین حساسیت رطوبتی بر اساس روش‌های مکانیکی با استفاده از مفاهیم تئوری ترمودینامیک.

تئوری انرژی آزاد سطحی

چندین تئوری انرژی آزاد سطحی مواد را بر اساس ساختار مولکولی‌شان تشریح می‌کنند. از مهم‌ترین تئوری‌هایی که به‌صورت گسترده برای تشریح مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی مواد مختلف به کار رفته است، می‌توان به تئوری اسیدی-بازی اشاره کرد [13]. بر طبق این تئوری، انرژی آزاد سطحی کل هر ماده‌ای، بر اساس نوع نیروهای مولکول‌های سطح به سه مؤلفه تقسیم می‌شود. این مؤلفه‌ها عبارت‌اند از:

۱. مؤلفهٔ غیر قطبی یا مؤلفهٔ لیفشیتز-ون در والز (LW)؛
۲. مؤلفهٔ اسیدی لوئیس؛
۳. مؤلفهٔ بازی لوئیس.

انرژی آزاد سطحی کل با ترکیب این مؤلفه‌ها به طریق زیر به دست می‌آید:

$$\Gamma = \Gamma^{LW} + \Gamma^{AB} \qquad (١)$$

که در آن Γ انرژی آزاد سطحی کل ماده، Γ^{LW} مؤلفهٔ غیر قطبی انرژی آزاد سطحی و Γ^{AB} مؤلفهٔ قطبی انرژی آزاد سطحی است. مؤلفهٔ قطبی انرژی آزاد سطحی طبق رابطهٔ زیر از پارامتر اسید لوییس (Γ^+) و باز لوییس (Γ^-) تشکیل شده است:

$$\Gamma^{AB} = 2\sqrt{\Gamma^+\Gamma^-} \qquad (٢)$$

از دید ترمودینامیکی انرژی آزاد پیوستگی ΔG_i^c، مقدار انرژی مورد نیاز برای ایجاد یک ترک با سطح واحد در داخل یک ماده تعریف می‌شود. بر اساس تعریف انرژی آزاد سطحی، ساده است تا کار کل پیوستگی را برای مواد گوناگون به شرح زیر نشان داد:

$$W^{AC} = 2\Gamma^{AB} \qquad (٣)$$

که در آن Γ_A انرژی آزاد سطحی کل مادهٔ مورد نظر است. کار پیوستگی یک قیر یک پارامتر مهم است که در بعضی از معادلات پایه مکانیک شکست برای تعیین انرژی مورد نیاز برای رشد ترک‌های خیلی‌ریز در داخل فاز قیری یا فاز ماستیک مخلوط قیری به کار می‌رود.

انرژی آزاد چسبندگی (ΔGa) همان‌طور که قبلاً تعریف شد دو مؤلفهٔ اصلی دارد. مؤلفهٔ قطبی یا اسیدی-بازی و مؤلفهٔ غیر قطبی یا لیفشیتز-ون در والز. رابطهٔ زیر برای مشخص کردن انرژی آزاد چسبندگی بین قیر و سنگ‌دانه مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$\Delta G_i^a = \Delta G_i^{aLW} + \Delta G_i^{aAB} = 2\left[\left(\sqrt{\Gamma_S^{lw}\Gamma_l^{lw}}\right) + \left(\sqrt{\Gamma_S^{+}\Gamma_l^{-}}\right) + \left(\sqrt{\Gamma_S^{-}\Gamma_l^{+}}\right)\right] \qquad (٤)$$

که در آن ΔG_i^a انرژی آزاد چسبندگی، ΔG_i^{aLW} مؤلفهٔ غیر قطبی انرژی آزاد چسبندگی، ΔG_i^{aAB} مؤلفهٔ قطبی انرژی آزاد چسبندگی، Γ_l^{LW} و Γ_l^+ و Γ_l^- مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و Γ_S^{LW} و Γ_S^+ و Γ_S^- مؤلفه‌ها انرژی آزاد سطحی سنگ‌دانه هستند. برای یک مخلوط قیر و سنگ‌دانه رابطهٔ (٤) هنگامی به کار می‌رود که مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر و سنگ‌دانه مورد نظر اندازه‌گیری شده باشند. رابطهٔ زیر برای محاسبه چسبندگی قیر و سنگ‌دانه در حضور آب مورد استفاده قرار می‌گیرد که اندیس‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب نشان‌دهندهٔ قیر، سنگ‌دانه و آب است. اگر مقادیر انرژی آزاد چسبندگی منفی باشد این بدان معنی است که دو ماده تمایل به چسبندگی با یکدیگر دارند و هر چه مقدار منفی بیشتر شود این تمایل افزایش می‌یابد:

$$\Delta G_{132}^a = \Gamma_{12} - \Gamma_{13} - \Gamma_{23} = -\begin{bmatrix} \left(2\Gamma_3^{LW}\right) + \left(4\sqrt{\Gamma_3^+\Gamma_3^-}\right) - \left(2\sqrt{\Gamma_1^{LW}\Gamma_3^{LW}}\right) \\ -\left(2\sqrt{\Gamma_3^+\Gamma_1^-}\right) - \left(2\sqrt{\Gamma_1^+\Gamma_3^-}\right) - \left(2\sqrt{\Gamma_2^{LW}\Gamma_3^{LW}}\right) \\ -\left(2\sqrt{\Gamma_3^+\Gamma_2^-}\right) - \left(2\sqrt{\Gamma_2^+\Gamma_3^-}\right) + \left(2\sqrt{\Gamma_1^{LW}\Gamma_2^{LW}}\right) \\ +\left(2\sqrt{\Gamma_1^+\Gamma_2^-}\right) + \left(2\sqrt{\Gamma_2^+\Gamma_2^-}\right) \end{bmatrix} \qquad (٥)$$

مصالح

در این پژوهش از دو نوع سنگ‌دانهٔ سنگ‌آهک و گرانیت با حساسیت‌های مختلف در برابر خرابی رطوبتی استفاده شده است. دلیل اصلی استفاده از سنگ‌دانه‌های با ساختار

کانی‌شناسی مختلف این است که تأثیر نوع کانی‌های سنگ‌دانه‌ها نیز مورد بررسی قرار گیرد و جامعیت پژوهش مورد بررسی افزایش یابد. ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی سنگ‌دانهٔ فوق به ترتیب در جداول (۱) و (۲) آورده شده است. دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده (دانه‌بندی میانی استاندارد ASTM برای دانه‌بندی متراکم) در جدول شماره (۳) آورده شده است. قیر خالص با درجه نفوذ ۷۰-۶۰ مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات مهندسی قیر مورد استفاده در جدول شماره (٤) ارائه شده است.

جدول ۱ ترکیبات شیمیایی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در این پژوهش (٪)

نوع سنگ‌دانه	Aluminium oxide, Al_2O_3	Ferric oxide, Fe_2O_3	Magnesium oxide, MgO	Calcium oxide, CaO	Silicon dioxide, SiO_2
سنگ‌آهک	٤/٨	٣/٧	٢/٦	٩٦/٣	١٢/٤
گرانیت	١/٩	٧/٥	٢/١	٣٢/٦	٥٦/٤

جدول ۲ خصوصیات فیزیکی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

آزمایش	گرانیت	سنگ‌آهک	استاندارد	محدوده
وزن مخصوص حجمی (درشت‌دانه)	٢/٦٤	٢/٦٦	ASTM C 127	----
وزن مخصوص مؤثر (درشت‌دانه)	٢/٦٦	٢/٦٧	ASTM C 127	----
وزن مخصوص ظاهری (درشت‌دانه)	٢/٦٩	٢/٦٩	ASTM C 127	----
وزن مخصوص حجمی (ریزدانه)	٢/٦٤	٢/٦٥	ASTM C 128	----
وزن مخصوص مؤثر (درشت‌دانه)	٢/٦٦	٢/٦٨	ASTM C 128	----
وزن مخصوص ظاهری (ریزدانه)	٢/٦٧	٢/٦٩	ASTM C 128	----
وزن مخصوص فیلر (gm/cm^3)	٢/٦٨	٢/٦٨	ASTM D854	----
سایش لس‌آنجلس (٪)	٢٥	٤٠	ASTM C 131	حداکثر ٤٥
ذرات پولکی و سوزنی (٪)	٩	٧	ASTM D 4791	حداکثر ١٠
آزمایش سلامت (٪)	١٠	٩	ASTM C 88	حداکثر ٢٠-١٠
شکستگی ریزدانه‌ها (٪)	٦٣	٥٩	ASTM C 1252	حداقل ٤٠

جدول ۳ دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده در این پژوهش

الک (mm)	١٩	١٢/٥	٤/٧٥	٢/٣٦	٠/٣	٠/٠٧٥
محدوده عبوری (٪)	١٠٠	١٠٠-٩٠	٧٤-٤٤	٥٨-٢٨	٢١-٥	١٠-٢
انتخاب‌شده (٪)	١٠٠	٩٥	٥٩	٤٣	١٣	٦

جدول ٤ خصوصیات مهندسی قیر مورد استفاده در این پژوهش

قیر	افت وزنی (٪)	نقطه اشتعال (°C)	چکش‌خواری (cm)	نقطه نرمی (°C)	درجه نفوذ (mm/10)	حلالیت (٪)
استاندارد	ASTM D1754-78	ASTM D92-78	ASTM D113-79	ASTM D36-76	ASTM D5-73	ASTM D2042-76
٧٠-٦٠	٠/٧٥	٢٦٢	١٠٥	٥١	٦٩	٩٩/٥

PVC به‌وسیله پلیمریزاسیون مونومر وینیل کلراید شکل می‌گیرد. پلی وینیل کلراید از گسترده‌ترین پلیمرهای استفاده شده در گروه پلیمرهای وینیلی است. PVC به دو صورت نرم (همراه نرم‌کننده) و سخت وجود دارد که در این پژوهش از پودر نوع سخت آن به‌عنوان افزودنی ضد عریان‌شدگی در ۱ و ۲ درصد جرم قیر استفاده شده است.

طراحی آزمایش‌ها

اصلاح قیر با مواد افزودنی ضد عریان‌شدگی

همان‌طور که قبلاً گفته شد، در این پژوهش از مادهٔ PVC به‌اندازه ۱ و ۲ درصد جرم قیر استفاده شده است. دلیل استفاده از درصدهای ذکر شده این است که طبق مطالعات پیشین این درصدها باعث بهترین عملکرد در خصوصیات شیارشدگی و خستگی شده است. به این منظور، قیر خالص تا دمای ۱٦۰ درجه گرم شده و سپس مقدار مورد نظر مادهٔ مورد نظر اضافه شده و در هم‌زن با ٤۰۰۰ دور در دقیقه به مدت ۱۰ دقیقه عمل اختلاط انجام می‌شود. به‌منظور شبیه‌سازی شرایط، نمونه‌هایی که در آنها افزودنی وجود ندارد نیز در همین شرایط قرار می‌گیرند. سپس از قیرهای خالص و اصلاح‌شده در ساخت نمونه‌های مخلوط‌های آسفالتی استفاده شده است. توجه به دما و زمان انتخاب شده برای اصلاح قیر مقداری پیرشدگی برای قیر اصلاح‌شده رخ خواهد داد. برای اینکه این پیرشدگی بر روی نتایج تحلیل آزمایش‌ها تأثیر نگذارد، قیر پایه نیز تحت شرایط تجربه‌شده برای قیرهای اصلاح شده قرار گرفت.

آزمایش حساسیت رطوبتی به روش AASHTO T283

در این پژوهش به‌منظور بررسی تأثیر عملکرد مخلوط‌های آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی از روش مکانیکی بر اساس استاندارد AASHTO T283 به‌عنوان فراگیرترین روش موجود استفاده شده است. به‌منظور بررسی روشن‌تر تفاوت در عملکرد مخلوط‌های آسفالتی مختلف، از آزمایش‌های نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم (در ۱، ۳ و ۵ سیکل یخ-ذوب) استفاده شده است.

برای انجام آزمایش حساسیت رطوبتی به روش لاتمن اصلاح شده برای هر مخلوط باید سه نمونه در شرایط مرطوب و سه نمونه در شرایط خشک ساخته شود. نمونه‌های با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲/۵±٦۳/۵ میلی‌متر یا نمونه‌های با قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۵±۹۵ میلی‌متر در این استاندارد مورد آزمایش قرار می‌گیرند. نمونه‌ها باید به نحوی متراکم شوند که درصد هوای آنها بین ۰/۵±۷ درصد باشد. نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش با استفاده از دستگاه چکش مارشال ساخته شده است. برای رسیدن به درصد هوای مورد نظر ابتدا بایستی تعداد ضربات مورد نیاز برای رسیدن به این درصد از تراکم مشخص شود. به این منظور ابتدا نمونه با ٤۰ ضربه و سپس با ۵۵ ضربه متراکم شده است، درصورتی‌که درصد هوای ۷ درصد بین نمونه‌های کوبیده‌شده بین این دو تعداد ضربه باشد با استفاده از درون‌یابی مقدار ضربات لازم برای ۷ درصد حفرات هوا تعیین می‌شود. اگر درصد هوا در ۵۵ ضربه کماکان از ۷ درصد کمتر باشد، تعداد ۷۵ ضربه استفاده می‌شود تا درصد هوای متناظر با ۷۵ ضربه به دست آید. سپس با درون‌یابی بین درصد هوای متاظر در تعداد ضربه‌های ۵۵ و ۷۵ تعداد ضربات مورد نیاز برای رسیدن به ۷ درصد حفرات هوا به دست می‌آید. دلیل استفاده از مقدار ۷ درصد فضای خالی در این آزمایش این است که طبق مطالعات میدانی در درصد فضای خالی کمتر یا بیشتر از مقدار ذکر شده یا رطوبت وارد مخلوط آسفالتی نمی‌شود یا به‌سرعت خارج می‌شود. لذا، این درصد از فضای خالی بیشترین تأثیر منفی را در مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر رطوبت می‌گذارد.

پس از متراکم کردن نمونه‌هایی قطر، ارتفاع آنها اندازه‌گیری می‌شود. سپس، وزن مخصوص حقیقی و

حداکثر اندازه‌گیری می‌شود و بر اساس آنها حجم و میزان حجم حفرات هوا اندازه‌گیری می‌شود. سپس، نیمی از نمونه‌های هر گروه (سه نمونه) در شرایط خشک باقی می‌مانند (نمونه‌های خشک) و نیمی از آنها (سه نمونه) باید تحت شرایط قرار گیرند (نمونه‌های مرطوب).

گروه دوم از نمونه‌ها، ابتدا به وسیله شرایط خلأ نسبی (فشار مطلق ٦٧-١٣ کیلوپاسکال) به مدت پنج دقیقه اشباع می‌شوند. سپس به مدت ١٠-٥ دقیقه در حالت مستغرق و بدون شرایط خلأ نگهداری می‌شوند. سپس بیرون آورده و جرم آنها اندازه‌گیری می‌شود و درصد اشباع نمونه‌ها به دست می‌آید. اگر درصد اشباع کمتر از ٧٠ درصد باشد باید نمونه‌ها را دوباره تحت شرایط خلأ قرار داد. اگر درصد اشباع نمونه‌ها بیش از ٨٠ درصد باشد، نمونه آسیب‌دیده محسوب می‌شود و باید یک نمونه جدید به‌جای آن ساخته شود و برای نمونه جدید زمان‌های شرایط خلأ کمتری در نظر گرفت تا درصد اشباع آن بین ٧٠ تا ٨٠ درصد باشد.

نمونه‌های اشباع‌شده در داخل کیسه‌های پلاستیکی قرار داده شده و در آن ١٠ میلی‌لیتر آب ریخته می‌شود. نمونه‌ها در داخل فریزر در دمای ١٨- درجه سانتی‌گراد به مدت ١٦ ساعت نگهداری می‌شوند. سپس، نمونه‌ها را در حمام آب گرم با دمای ٦٠ درجه سانتی‌گراد برده و پلاستیک‌ها را برداشته و اجازه داده می‌شود ٢٤ ساعت در این دما بماند. سپس، نمونه‌ها به دمای اتاق (٢٥ درجه سانتی‌گراد) آورده می‌شوند. این نمونه‌ها را نمونه‌های مرطوب می‌نامند.

بارگذاری آزمایش مقاومت کشش غیرمستقیم با نرخ بارگذاری ٥/٠٨ سانتی‌متر (٢ اینچ) بر دقیقه انجام می‌شود تا لحظه‌ای که نمونه گسیخته شود. مقدار بار در لحظه گسیختگی ثبت می‌شود.

با استفاده از رابطهٔ زیر مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم هر شش نمونه به دست می‌آید:

$$ITS = {}^{2F}/_{t\pi d} \qquad (٦)$$

که در آن، ITS مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم (kPa)، F مقدار نیروی لحظه گسیختگی (kN)، t ضخامت نمونه آسفالتی (m) و d قطر نمونه آسفالتی (m) است.

میانگین مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های خشک (سه نمونه) و مرطوب (سه نمونه) جداگانه حساب می‌شود. حساسیت رطوبتی یا پتانسیل عریان‌شدگی نمونه‌های مخلوط آسفالتی با نسبت میانگین مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های مرطوب به خشک (برحسب درصد) به دست می‌آید:

$$TSR = \left({}^{ITS_{wet}}/_{ITS_{dry}}\right) * 100 \qquad (٧)$$

که در آن TSR نسبت مقاومت کشش غیرمستقیم (٪)، ITS_{wet} میانگین مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های مرطوب (kPa) و ITS_{dry} میانگین مقدار مقاومت کشش غیرمستقیم نمونه‌های خشک (kPa) است.

اندازه‌گیری اجزای انرژی آزاد سطحی قیر و سنگ‌دانه

به‌منظور اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگ‌دانه‌ها و قیرها می‌توان از روش‌های گوناگونی استفاده کرد. با توجه به حساسیت اندازه‌گیری در این آزمایش‌ها، در این پژوهش از روش‌هایی استفاده شده است که در پژوهش‌های پیشین به دقت بالاتر آنها نسبت به سایر آزمایش‌های رایج اشاره شده است [14]. انرژی آزاد سطحی سنگ‌دانه‌ها و قیرهای مورد استفاده در این پژوهش به ترتیب با استفاده از روش دستگاه جذب همگانی (Universal Sorption Device (USD)) و صفحه ویلهلمی (Wilhelmy plate) که به‌وسیله بی هسین و لیتل [15] و هفر و هفر و همکاران [16,17] توسعه داده شده است، اندازه‌گیری شده‌اند [18].

اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگ‌دانه‌ها. دستگاه USD به‌طور غیرمستقیم با استفاده از جذب گاز

توسط سه حلال، انرژی سطحی سنگ‌دانه را تعیین می‌کند. در ابتدا سنگ‌دانه خشک و الک شده و از الک ۴/۷۵ میلی‌متر عبور داده می‌شوند و بر روی الک ۲/۳۶ میلی‌متر باقی می‌مانند. اندازه سنگ‌دانه با استفاده از نگه‌دارندهٔ مشبک آلومینیومی در USD کنترل می‌شود. حدود ۴۰ گرم از سنگ‌دانه بر روی الک ۲/۳۶ میلی‌متر شسته می‌شوند تا غبار بر روی آن‌ها پاک شود. سنگ‌دانه‌ها در انتها درون سیکل شستشو شامل آب مقطر، متانول، هگزان و دوباره متانول قرار می‌گیرد. بعد از شستشو، سنگ‌دانه‌ها به مدت ۴ ساعت درون اوون قرار می‌گیرند. پس از خشک شدن، سنگ‌دانه به دمای اتاق آورده شده و در دسیکاتور قرار می‌گیرند. به‌محض سرد شدن مصالح، با استفاده از نگه‌دارندهٔ مشبک آلومینیومی در USD قرار داده می‌شوند. انرژی آزاد سطحی کل و مؤلفه‌های مربوط به سه حلال در جدول (۵) آورده شده است.

مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سه نوع ماده تحقیق مورد استفاده در این پژوهش در جدول (۵) آورده شده است.

برای هر یک از مایعات باید رابطه‌ای مانند رابطهٔ (۸) تشکیل شود:

$$W^{a}_{S,V} = \pi_e + 2\Gamma_v^{total} = -2\left[\sqrt{\Gamma_s^{LW}\Gamma_l^{LW}} + \sqrt{\Gamma_s^{+}\Gamma_l^{-}} + \sqrt{\Gamma_s^{-}\Gamma_l^{+}}\right] \quad (۸)$$

که در آن، $W^{a}_{s,v}$ کار چسبندگی بین سطح سنگ‌دانه (s) و بخار (v)، Γ_V^{total} انرژی آزاد سطحی کل بخار ماده تحقیق و π_e فشار توزیعی تعادلی مربوط به بخار مادهٔ تحقیق بر روی سطح سنگ‌دانه است.

فشـــار توزیعی تعادلی بخار مادهٔ تحقیق بر روی ســطح ســنگ‌دانه از طریق جذب ســطحی هم‌دمایی با استفاده از رابطهٔ (۹) به دست می‌آید:

$$\pi_e = \frac{RT}{MA}\int_0^{P_n}\frac{n}{p}dp \quad (۹)$$

که در آن، R ثابت جهانی گاز، T دمای آزمایش، M وزن مولکولی بخـار مـادهٔ تحقیق، n جرم بخـار جذب‌شده در واحد جرم سنگ‌دانه در فشار بخار p و A مساحت سطح ویژه سنگ‌دانه است.

مســاحت ســطح ویژهٔ ســنگ‌دانه از طریق رابطه کلاسیک BET با استفاده از رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$A = \left(\frac{n_m \times N_0}{M}\right) \times \alpha \quad (۱۰)$$

که در آن، N_0 عدد آووگادرو، α سطح تصویر شدهٔ یک مولکول، n_m ظرفیت تک لایه‌ای قابل جذب بر روی سطح سنگ‌دانه است. تعداد مولکول‌های مورد نیاز برای پوشاندن سطح سنگ‌دانه در یک لایه را ظرفیت تک لایه‌ای قابل جذب بر روی سطح سنگ‌دانه می‌گویند. این فاکتور را می‌توان از طریق رابطهٔ (۱۱) به دست آورد. در این رابطه S و I به ترتیب شیب و طول از مبدأ نموداری است که $p/n\ (p_0-p)$ را در برابر p/p_0 نشان می‌دهد که در آن p_0،p و n به ترتیب فشار بخار جزئی، حداکثر فشار بخار اشباع و جرم بخار جذب‌شده بر روی جرم واحد سنگ‌دانه هستند:

$$n_m = \frac{1}{S+I} \quad (۱۱)$$

رابطهٔ بعدی برای محاســبهٔ مؤلفه‌های غیر قطبی SFE با استفاده از یک حلال غیر قطبی به دست می‌آید:

$$\Gamma_2^{LW} = \frac{(\pi_e + 2\Gamma_1)^2}{4\Gamma_1^{LW}} \quad (۱۲)$$

یک مایع تک‌قطبی (m) و یک مایع دوقطبی (b) برای تعیین مؤلفه‌های اسید–باز به کار گرفته می‌شوند:

$$\Gamma_2^{+} = \frac{\left[\pi_e + 2\Gamma_{1m} - \left(\Gamma_2^{LW}\Gamma_{1m}^{LW}\right)\right]}{2\Gamma_{1m}^{-}} \quad (۱۳)$$

$$\Gamma_2^{+} = \frac{\left[\pi_e + 2\Gamma_{1b} - 2\left(\Gamma_2^{LW}\Gamma_{1b}^{LW}\right) - 2\left(\Gamma_2^{+}\Gamma_{1b}^{LW}\right)\right]^2}{4\Gamma_{1b}^{+}} \quad (۱۴)$$

انرژی آزاد سطحی کل سنگ‌دانه نیز از رابطهٔ پیش رو به دست می‌آید:

$$\Gamma = \Gamma_2^{LW} + 2(\Gamma_2^{+}\Gamma_2^{-}) \quad (۱۵)$$

جدول ۵ مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی مواد تحقیق برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگ‌دانه‌ها ($ergs/cm^2$)

مؤلفه‌های SFE	مؤلفه‌ها انرژی آزاد سطحی ($ergs/cm^2$)				
	بازی	اسیدی	قطبی	غیر قطبی	کل
اِن هگزان	۰	۰	۰	۱۸/٤	۱۸/٤
اتیلن پروپیل کتون	۱۹/٦	۰	۰	۲٤/۷	۲٤/۷
آب	۲۵/۵	۲۵/۵	۵۱	۲۱/۸	۷۲/۸

جدول ٦ مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی مواد تحقیق برای اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیر ($ergs/cm^2$)

مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی	مؤلفه‌ها انرژی آزاد سطحی ($ergs/cm^2$)				
	بازی	اسیدی	قطبی	غیر قطبی	کل
آب	۲۵/۵	۲۵/۵	۵۱	۲۱/۸	۷۲/۸
گلیسرول	۵۷/٤	۳/۹۲	۲۸/۸	۳٤	٦۲/۸
فرمامید	۳۹/٦	۲/۲۸	۱۹	۳۹	۵۸

اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرها. زاویهٔ تماس بین قیر و یک مایع را می‌توان با استفاده از روش صفحه ویلهلمی که بر اساس تعادل نیروهای جنبشی یک صفحه بسیار نازک در حال غوطه‌ور شدن یا بیرون کشیدن از یک مایع تحت سرعت ثابت و بسیار پایین است، به دست آورد. هنگامی‌که یک صفحه در هوا معلق باشد، رابطهٔ (١٦) برای تعیین میزان نیروی لازم برای نگه‌داشتن آن در وضعیت تعادل به کار می‌رود:

$$F = Wt_{plate} + Wt_{asphalt} - V.\rho_{air}.g \qquad (١٦)$$

که در آن، F نیروی لازم برای ثابت نگه‌داشتن صفحه، W_{plate} وزن صفحه فلزی، $W_{asphalt}$ وزن قیر، V حجم صفحهٔ قیری، g شتاب جاذبه محلی و ρ وزن مخصوص هوا می‌باشند.

هنگامی‌که صفحهٔ آغشته به قیر در یک مایع غوطه‌ور می‌شود رابطهٔ (١٦) به رابطهٔ (١٧) تبدیل می‌شود:

$$F = Wt_{plate} + Wt_{asphalt} + P_t\Gamma_L\cos\theta - V_{im}.\rho_L.g - (V - V_{im}).\rho_{air} \qquad (١٧)$$

که در آن، P_t محیط صفحهٔ آغشته به قیر، Γ_L انرژی آزاد سطحی کل مایع، θ زاویه تماس دینامیکی بین قیر و مایع آزمایش، V_{im} حجم قسمت غوطه‌ور صفحهٔ آغشته به قیر، V حجم کل صفحهٔ قیری و ρ_L وزن مخصوص مایع می‌باشند.

با ترکیب دو رابطهٔ بالا رابطهٔ زیر به دست می‌آید:

$$\Delta F = P_t\Gamma_L\cos\theta - V_{im}.\rho_L.g + V_{im}.\rho_{air}.g \qquad (١٨)$$

با نوشتن دوبارهٔ رابطهٔ بالا برحسب مجهول زاویهٔ تماس همهٔ مجهولات سمت راست تساوی را می‌توان با استفاده از روش صفحه ویلهلمی به دست آورد:

$$\cos\theta = \frac{(\Delta F + V_{im}.(\rho_L - \rho_{air}).g)}{P_t\Gamma_L} \qquad (١٩)$$

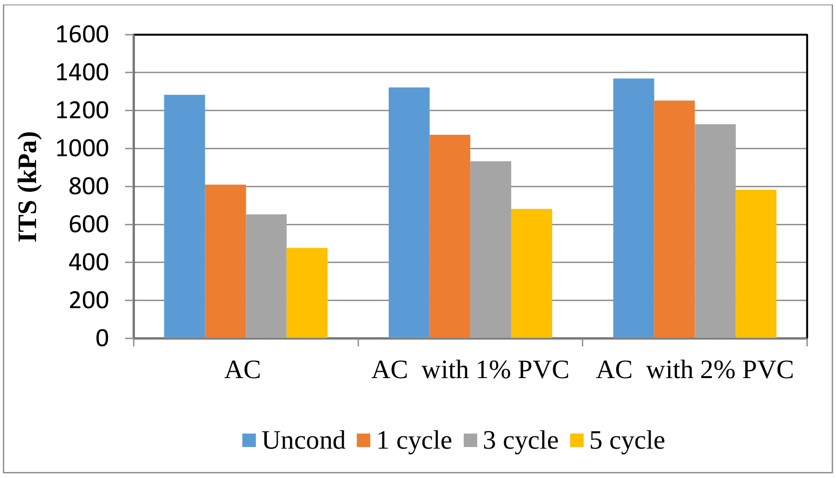
معادلات Good-van Oss-Chaudhury [25] برای ارتباط زاویهٔ اتصال و مؤلفه‌های انرژی سطحی استفاده می‌شود:

$$\Gamma_{L1}(1+\cos\theta) = 2[(\Gamma_{Li}^{LW}\Gamma_2^{LW})^{0.5} + (\Gamma_{Li}^{-}\Gamma_2^{+})^{0.5} + (\Gamma_{Li}^{+}\Gamma_2^{-})^{0.5}] \qquad (٢٠)$$

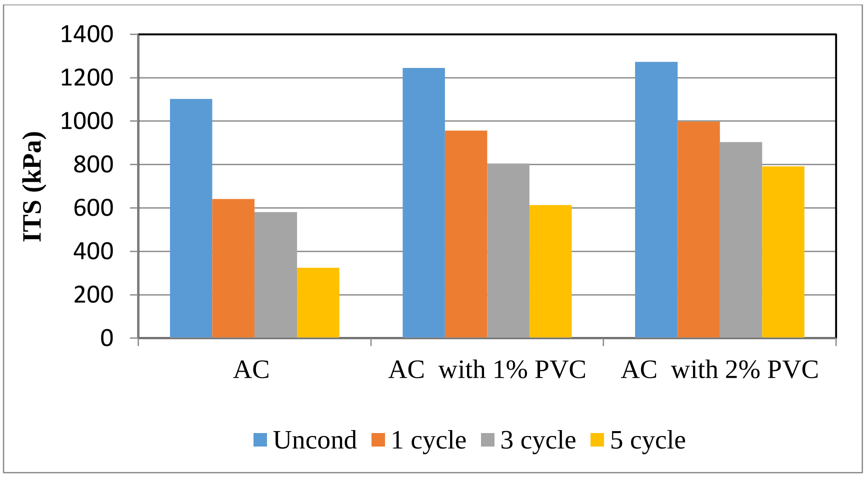
آب، گلیسیرین و فورمامید در این پژوهش به خاطر مقادیر نسبتاً بزرگ مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی، غیر قابل اختلاط بودن با قیر و متفاوت بودن مقادیر مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی مورد استفاده قرار گرفتند. مؤلفه‌های انرژی سطحی آنها در جدول (٦) آورده شده است.

نتایج و بحث

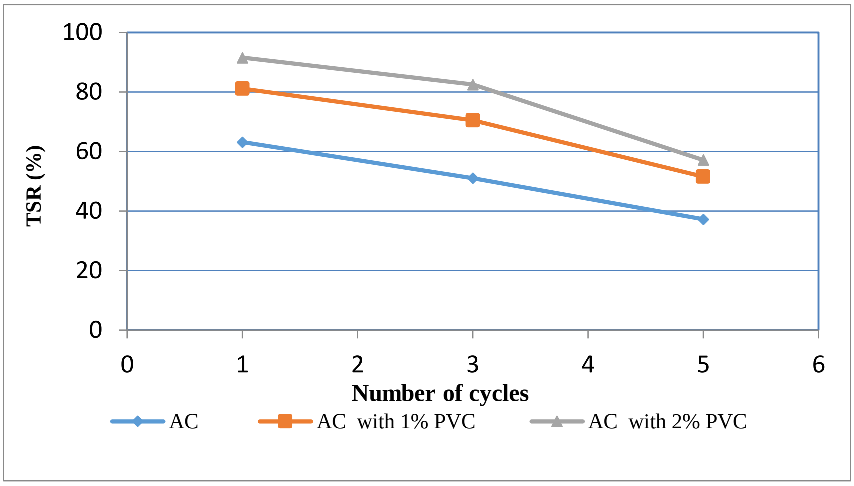
نتایج مربوط به مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها در سیکل‌های مختلف شرایط محیطی در شکل‌های (۱) و (۲) ارائه شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌های ساخته‌شده با افزایش تعداد سیکل‌های یخ–ذوب کاهش می‌یابد. کاهش در مقاومت کششی غیرمستقیم نمونه‌ها با افزایش تعداد سیکل‌های یخ–ذوب را می‌توان به از دست دادن چسبندگی مخلوط یا پیوستگی قیر ناشی از حضور بیشتر نمونه‌ها در معرض رطوبت نسبت داد. می‌توان از داده‌های این دو شکل نتیجه‌گیری کرد که اضافه کردن مادهٔ PVC به‌عنوان مادهٔ ضد عریان‌شدگی چسبندگی و پیوستگی را در مخلوط افزایش داده و اجازهٔ جابه‌جایی سریع قیر را از روی سطوح سنگ‌دانه‌ها نمی‌دهد و سبب می‌شود که مخلوط پس از سیکل‌های یخ– ذوب مقاومت بالاتری در برابر رطوبت نسبت به نمونه‌های بدون مواد افزودنی داشته باشد.



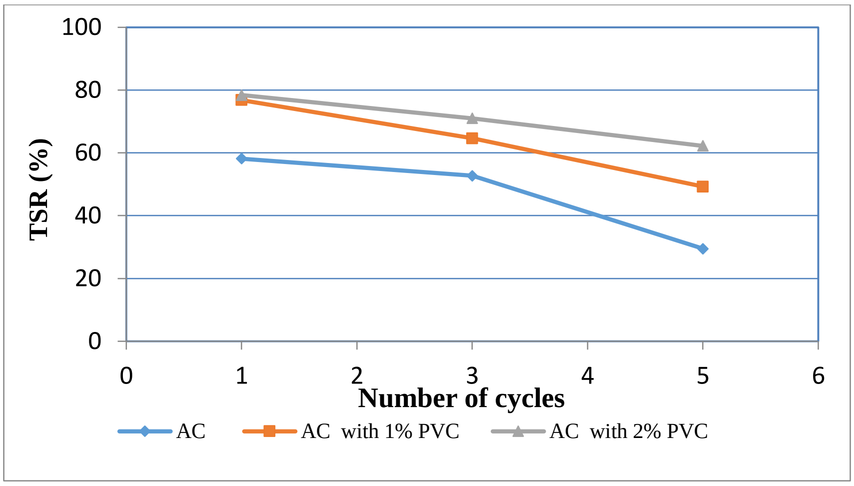
شکل ۱ نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌های سنگ‌آهک



شکل ۲ نتایج آزمایش مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌های گرانیت



شکل ۳ نتایج آزمایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌های سنگ‌آهک



شکل ٤ نتایج آزمایش نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌های گرانیتی

نتایج مربوط به نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در سیکل‌های مختلف یخ–ذوب در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌های سنگ‌آهک و گرانیتی به ترتیب در شکل‌های (۳) و (٤) ارائه شده است. استفاده از افزودنی‌های عریان‌شدگی باعث شده است تا مقاومت مخلوط‌های آسفالتی اصلاح‌شده نسبت به نمونه‌های کنترل بهبود یابد. همچنین، مشاهده می‌شود که در اکثر نمونه‌ها کاهش در نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در سیکل ۳ تا ۵ نسبت به سیکل ۱ تا ۳ بیشتر است. درواقع بعد از سیکل‌های یخ–ذوب قسمتی از سطح سنگ‌دانه‌ها از قیر جدا شده و این قسمت دیگر دارای چسبندگی مناسب برای تحمل بار نیست. این موضوع سبب می‌شود بعد از ۳ سیکل یخ–ذوب روند خرابی نمونه تسریع می‌یابد. به‌صورت کلی از داده‌های شکل‌های (۳) و (٤) مشخص است که در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌های سنگ‌آهک مقاومت بیشتری در برابر خرابی رطوبتی وجود دارد. عمده دلیل این رفتار را می‌توان از روی ساختار کانی‌های تشکیل‌دهنده این دو نوع سنگ‌دانه در جدول (۱) مشاهده نمود. در شکل (۳) مشاهده می‌شود که در نمونه‌های ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌های سنگ‌آهک استفاده از ۲ درصد PVC بهترین تأثیر را در افزایش مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی

ایجاد کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزایش در درصد افزودنی‌ها در این دسته از نمونه‌ها باعث بهبود قابل توجه در نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم شده است. روند مشابهی در افزایش مقاومت مخلوط‌های آسفالتی در نتیجه استفاده از نانومواد در نمونه‌های با سنگ‌دانه‌های گرانیتی در شکل (٤) قابل مشاهده است. البته در این دسته از نمونه‌ها تفاوت در نمونه‌های با ۱ و ۲ درصد افزودنی کمتر از نمونه‌های ساخته‌شده با سنگ‌دانه‌های سنگ‌آهک است.

ترکیبات شیمیایی هر دو نوع سنگ‌دانه به‌کاررفته در این پژوهش در جدول (۱) ارائه شده است. این جدول نشان می‌دهد که سنگ‌آهک عمدتاً از کانی Cao تشکیل شده است درحالی‌که سنگ‌دانه‌های گرانیت عمدتاً از SiO_2 و Al_2O_3 تشکیل شده است. دسته‌بندی سنگ‌دانه‌ها بدین‌صورت است که سنگ‌دانه‌های سنگ‌آهک را آب‌گریز و سنگ‌دانه‌های گرانیت را آب‌دوست در نظر می‌گیرند. با استفاده از روند دو شکل زیر نیز می‌توان تشخیص داد که سنگ‌آهک در مقایسه با سنگ‌دانه گرانیتی مخلوط‌های مقاوم‌تری را در برابر رطوبت فراهم می‌کنند. همان‌طور که از نتایج نسبت کشش غیرمستقیم ارائه شده در شکل‌های زیر مشخص است مقاومت کششی نمونه‌های خشک نسبت به نمونه‌های مرطوب به میزان قابل توجهی کمتر است که این تفاوت نشانه خرابی ایجاد شده در مخلوط‌های آسفالتی ناشی از اثر رطوبت است. این کاهش در مقاومت نمونه‌های مرطوب نسبت به نمونه‌های خشک در نمونه‌های اصلاح شده نسبت به نمونه‌های کنترل کمتر است.

نتایج مربوط به اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای پایه و اصلاح‌شده در جدول (۷) ارائه شده است. همان‌طور که از داده‌های ارائه‌شده در این جدول مشخص است، مؤلفهٔ اسیدی قیر پایه ($ergs/cm^2$ ۱/۵۸) به میزان قابل توجهی از مؤلفهٔ بازی آن ($ergs/cm^2$ ۰/٦۱) بزرگ‌تر است. این موضوع نشان‌دهندهٔ این است که قیر خصوصیات اسیدی دارد. همچنین، از داده‌های ارائه‌شده در این جدول مشخص است که بخش عمده‌ای از انرژی آزاد سطحی قیر را مؤلفهٔ غیر قطبی آن ($ergs/cm^2$ ۱۲/٤۸) تشکیل می‌دهد. درواقع، عمده چسبندگی شکل‌گرفته بین قیر و سنگ‌دانه ناشی از پیوندهای غیر قطبی یا کووالانسی است. استفاده از افزودنی PVC باعث شده است تا مؤلفهٔ اسیدی انرژی آزاد سطحی کاهش و مؤلفهٔ بازی آن افزایش یابد که این موضوع می‌توان باعث ایجاد چسبندگی بهتر بین قیر و سنگ‌دانه‌های اسیدی که مستعد خرابی رطوبتی هستند، شود. همچنین، استفاده از PVC باعث شده است تا مؤلفهٔ غیر قطبی انرژی آزاد سطحی قیر به نحو قابل توجهی افزایش یابد. نکتهٔ قابل ذکر این است که تفاوت چندانی بین مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای اصلاح‌شده با ۱ و ۲ درصد از PVC وجود ندارد. استفاده از افزودنی در هر دو درصد مختلف باعث شده است تا انرژی آزاد سطحی کل قیر افزایش یابد. این موضوع باعث می‌شود تا مقدار انرژی لازم برای گسیختگی در غشای قیری افزایش یابد و احتمال رخداد گسیختگی پیوستگی در ماستیک کاهش می‌یابد.

جدول ۷ مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی قیرهای مورد استفاده ($ergs/cm^2$)

مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی	مؤلفه‌ها انرژی آزاد سطحی ($ergs/cm^2$)				
	بازی	اسیدی	قطبی	غیر قطبی	کل
قیر ۷۰–٦۰	۰/٦۱	۱/۵۸	۱/۹٦	۱۲/٤۸	۱٤/٤٤
قیر ۷۰–٦۰ با ۱ درصد PVC	۱/۱۹	۱/٤٤	۲/٦۲	۱۹/٤۳	۱۹/٤۳
قیر ۷۰–٦۰ با ۲ درصد PVC	۱/۲٦	۱/۳۹	۲/٦۵	۲۰/۸٤	۲۰/۸٤

نتایج مربوط به اندازه‌گیری مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگ‌دانه‌ها در جدول (۸) ارائه شده است. همان‌طور که از داده‌های ارائه‌شده در این جدول می‌توان مشاهده نمود، سنگ‌دانه‌های سنگ‌آهک دارای مؤلفهٔ بازی بزرگ‌تر ($ergs/cm^2$ ۴۹۳/۲۵) نسبت به $ergs/cm^2$ ۴۰۲/۵۴) و مؤلفهٔ اسیدی کوچک‌تر ($ergs/cm^2$ ۱۰/۴۲ نسبت به $ergs/cm^2$ ۱۹/۲۸) انرژی آزاد سطحی در مقایسه با سنگ‌دانه‌های گرانیتی هستند. بزرگ بودن مؤلفهٔ بازی در سنگ‌دانه‌های سنگ‌آهک باعث می‌شود تا پیوندهای قوی‌تری بین این دسته از سنگ‌دانه‌ها و قیر که خصوصیات اسیدی دارد، شکل بگیرد و عریان‌شدگی با احتمال کمتری مورد انتظار باشد.

همچنین، مؤلفهٔ قطبی سنگ‌دانه‌های گرانیتی ($ergs/cm^2$ ۱۷۶/۱۹) در مقایسه با سنگ‌دانه‌های سنگ‌آهک ($ergs/cm^2$ ۱۴۳/۳۸) بزرگ‌تر است. این مطلب باعث شکل‌گیری پیوندهایی بین قیر و سنگ‌دانه‌های گرانیتی می‌شود که در حضور آب به‌راحتی شکسته می‌شوند. به‌علاوه، مؤلفهٔ غیر قطبی سنگ‌دانه‌های سنگ‌آهک در مقایسه با سنگ‌دانه‌های گرانیتی بزرگ‌تر است. مؤلفه غیر قطبی باعث ایجاد تشکیل پیوندهای کوالانسی می‌شود که در حضور آب پایدار می‌مانند.

نتایج مربوط به پارامترهای انرژی آزاد پیوستگی، انرژی آزاد چسبندگی و انرژی جداشدگی در جدول (۹) ارائه شده است. همان‌طور که از داده‌های ارائه‌شده در این جدول می‌توان مشاهده نمود، اصلاح قیر باعث شده است تا انرژی آزاد پیوستگی به نحو قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. این مطلب باعث می‌شود تا مقاومت قیر در برابر گسیختگی پیوستگی افزایش یابد.

جدول ۸ مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی سنگ‌دانه‌های مورد استفاده ($ergs/cm^2$)

مؤلفه‌های انرژی آزاد سطحی	مؤلفه‌ها انرژی آزاد سطحی ($ergs/cm^2$)				
	بازی	اسیدی	قطبی	غیر قطبی	کل
سنگ‌آهک	۴۹۳/۲۵	۱۰/۴۲	۱۴۳/۳۸	۱۴۳/۶۱	۲۸۶/۹۹
گرانیت	۴۰۲/۵۴	۱۹/۲۸	۱۷۶/۱۹	۱۰۵/۷۳	۲۸۱/۹۲

جدول ۹ انرژی آزاد سطحی پیوستگی و چسبندگی ($ergs/cm^2$)

مخلوط	سنگ‌دانه	قیر	انرژی جداشدگی	انرژی چسبندگی	انرژی پیوستگی
۱	سنگ‌آهک	قیر ۷۰-۶۰	۱۳۱/۲۳	۱۴۴/۵۵	۲۸/۸۹
۲		قیر ۷۰-۶۰ با ۱ درصد PVC	۱۲۱/۵۲	۱۶۵/۹۹	۴۴/۱۰
۳		قیر ۷۰-۶۰ با ۲ درصد PVC	۱۲۰/۰۵	۱۶۹/۰۳	۴۶/۹۷
۴	گرانیت	قیر ۷۰-۶۰	۱۲۱/۰۲	۱۲۹/۹۵	۲۸/۸۹
۵		قیر ۷۰-۶۰ با ۱ درصد PVC	۱۱۳/۳۱	۱۴۷/۳۸	۴۴/۱۰
۶		قیر ۷۰-۶۰ با ۲ درصد PVC	۱۱۲/۲۲	۱۵۱/۰۵	۴۶/۹۷

همچنین، استفاده از افزودنی‌های PVC باعث شده است تا مقدار انرژی آزاد چسبندگی در نمونه‌های حاوی هر دو نوع سنگ‌دانه افزایش یابد. این مطلب سبب می‌شود تا مقدار انرژی بیشتری برای جداسازی قیر از واحد سطح سنگ‌دانه مورد نیاز باشد. افزایش در درصد PVC باعث تغییر قابل توجهی در انرژی آزاد چسبندگی نشده است و می‌توان گفت این پارامتر در نمونه‌های حاوی ۱ و ۲ درصد افزودنی به یکدیگر نزدیک بوده است. نتایج مربوط به ستون انرژی جداشدگی نشان می‌دهد که استفاده از PVC باعث کاهش در انرژی جداشدگی شده است. این مطلب بدین معنی است که در رخداد عریان‌شدگی انرژی کمتری آزاد می‌شود. کاهش در انرژی جداشدگی سبب می‌شود تا سیستم تمایل کمتری به عریان‌شدگی داشته باشد و از نظر ترمودینامیک در حالت پایدارتری باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش سعی در استفاده از مواد افزودنی اصلاح کننده قیر به‌منظور مقاوم ساختن مخلوط آسفالتی در برابر خرابی ناشی از رطوبت در مخلوط‌های آسفالتی است. به‌منظور بررسی تأثیر افزودنی مورد استفاده در این پژوهش از روش های مکانیکی و ترمودینامیک استفاده شده است.

مهم‌ترین نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش عبارت‌اند از:

۱. استفاده از افزودنی‌های ضد عریان‌شدگی باعث شده است تا مؤلفهٔ اسیدی و بازی قیر پایه به ترتیب کاهش و افزایش یابند. این رخداد باعث می‌شود تا میزان چسبندگی قیر با سنگ‌دانه‌های سنگ‌آهک و گرانیتی افزایش یابد. همچنین، این ماده باعث شده است تا مؤلفهٔ غیر قطبی انرژی آزاد سطحی به میزان قابل توجهی افزایش یابد. این موضوع سبب می‌شود تا پیوندهای غیر قطبی که غیرقابل‌حل در آب هستند، با کیفیت بهتری شکل بگیرند. مقدار انرژی آزاد سطحی کل مربوط به قیرهای اصلاح‌شده از قیر پایه بیشتر است.

۲. انرژی آزاد چسبندگی در نمونه‌های اصلاح‌شده نسبت به نمونه‌های پایه افزایش می‌یابد و درواقع برای جدا کردن قیر از روی سطح واحد سنگ‌دانه به مقدار انرژی بیشتری نیاز است که باعث می‌شود تا احتمال رخداد عریان‌شدگی کاهش یابد. استفاده از PVC باعث می‌شود تا مقدار انرژی جداشدگی در نمونه‌های اصلاح‌شده کاهش یابد. این موضوع سبب می‌شود تا سیستم قیر- سنگ‌دانه از نظر ترمودینامیکی در حالت پایدارتری باشد و شدت رخداد عریان‌شدگی کاهش می‌یابد.

۳. استفاده از PVC باعث می‌شود تا مقدار نسبت مقاومت کششی غیرمستقیم در نمونه‌های با هر دو نوع سنگ‌دانه مورد استفاده در این پژوهش افزایش یابد.

٤. با توجه به اینکه ساختار تشکیل‌دهنده گرانیت دارای کانی‌های با خصوصیات آب‌دوستی بیشتر است، نمونه‌های ساخته‌شده با این نوع سنگ‌دانه در برابر خرابی رطوبتی مقاومت کمتری را از خود نشان داده‌اند.

۵. نتایج مربوط به هر دو پارامتر انرژی مورد استفاده در این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از PVC باعث می‌شود تا مقاومت مخلوط آسفالتی در برابر خرابی رطوبتی افزایش یابد.

مراجع

1. Moghadas Nejad, F., "Influence of using nonmaterial to reduce the moisture susceptibility of hot mix asphalt". *Construction and Building Materials*, Vol. 31, pp. 384-388, (2012).
2. Little, D.N. and Jones, D., "Chemical and mechanical processes of moisture damage in hot-mix asphalt pavements". Transportation Research Board National Seminar, San Diego, CA, USA, (2003).

3. Hamedi, G.H., Moghadas Nejad, F.M., and Oveisi, K., "Estimating the moisture damage of asphalt mixture modified with nano zinc oxide". Materials and Structures, Vol. 49, No. 4. pp. 1165-1174, (2016).
4. Solaimanian, M., "Test methods to predict moisture sensitivity of hot-mix asphalt pavements". Transportation Research Board National Seminar. San Diego, California, (2003).
5. Hamedi, G.H. and Moghadas Nejad, F., "Using energy parameters based on the surface free energy concept to evaluate the moisture susceptibility of hot mix asphalt". Road Materials and Pavement Design, Vol. 16, No. 2. pp. 239-255, (2015).
6. Cheng, D., "Surface free energy of asphalt-aggregate system and performance analysis of asphalt concrete based on surface free energy". (2002).
7. Bond, A., Hefer, A., and Little, D., "Adhesion in Bitumen-aggregate Systems and Quantification of the effects of water on the adhesive bond", (2005).
8. Hamedi, G.H. and Moghadas Nejad. F., "Evaluating the effect of mix design and thermodynamic parameters on moisture sensitivity of HMA". Materials in Civil Engineering: pp. In press, (2016).
9. Hamedi, G.H., "Moisture Damage of Asphalt Mixture Modeling Based on Surface Free Energy Theory", PhD Thesis, Department of Civil & Environmental Engineering, Moisture Damage Modeling Based on Surface Free Energy Theory. pp. 305, (2015).
10. Khodaii, A., "Evaluating the Effect of Zycosoil on Moisture Damage of Hot Mix Asphalt Using the Surface Energy Method". *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 26, No. 2. (2013).
11. Arabani, M. and Hamedi, G.H., "Using the surface free energy method to evaluate the effects of liquid antistrip additives on moisture sensitivity in hot mix asphalt". *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 15, No. 1. pp. 66-78, (2014).
12. Hamedi, G.H., "Evaluating the Effect of Asphalt Binder Modification Using Nanomaterials on the Moisture Damage of HMA". Road Materials and Pavement Design: p. In press, (2016).
13. Van Oss, C.J., Chaudhury, M.K., and Good, R.J., "Interfacial Lifshitz-van der Waals and polar interactions in macroscopic systems". Chemical Reviews, Vol. 88, No. 6., pp. 927-941, (1988).
14. Little, D.N., Bhasin, A., and Hefer, A., "Using surface energy measurements to select materials for asphalt pavement". Transportation Research Board, (2006).
15. Bhasin, A. and Little, D.N., "Characterization of aggregate surface energy using the universal sorption device". *Journal of Materials in Civil Engineering.* Vol. 19, No. 8. pp. 634-641, (2007).
16. Hefer, A.W., "Adhesion in bitumen-aggregate systems and quantification of the effects of water on the adhesive bond", Texas A&M University, (2004).
17. Hefer, A.W., Bhasin, A., and Little, D. N., "Bitumen surface energy characterization using a contact angle approach". *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 6, p. 759-767, (2006).

18. Mercado, E.A., "Influence of fundamental material properties and air void structure on moisture damage of asphalt mixes". Texas A&M University, (2007).